

Untersuchungen über ein
Empfindungsstärkenmaß für Vibrationen
des menschlichen Körpers: Die Vibronskala

von

HELLMUTH DINDINGER

Aus dem Physiologischen Institut der Universität Erlangen
Direktor: Professor Dr. O.F. Ranke

Untersuchungen über ein Empfindungsstärkenmaß für
Vibrationen des menschlichen Körpers: Die Vibronskala.

Inaugural - Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Hohen Medizinischen Fakultät
der
Friedrich-Alexander-Universität
zu
Erlangen

Vorgelegt von
Hellmuth D i n d i n g e r
aus Bromberg

Gedruckt mit Erlaubnis der Medizinischen Fakultät der
Universität Erlangen.



Dekan: Professor Dr. C. K o r t h

1. Referent: Professor Dr. W.D. K e i d e l

2. Referent: Professor Dr. O.F. R a n k e

Tag der mündlichen Prüfung: 27.11.1956..

Meiner Frau



Digitized by the Internet Archive
in 2026

1. Problemstellung:

Das Problem der vorliegenden Doktorarbeit bestand darin, ausgehend von den Stevens'schen Empfindungsstärkenskalen für Auge, Ohr und Kraftsinn für die Vibrationsempfindung des Menschen nach dem "Halbierungsverfahren" eine subjektive Empfindungsstärkenskala für Erschütterungsreize im Frequenzbereich von 50 bis 200 Hz von der Schwelle beginnend bis zu mittleren Reizstärken aufzustellen. Messungen im Frequenzbereich unter 50 Hz und solche bei den grossen Reizstärken sollten dann zur Aufstellung einer Skala führen, die entsprechend der "Sone-Skala" bei der Lärmmessung in Form einer Vibron-Skala die Erschütterungsbelastigung des Menschen einer quantitativen Aussage zugänglich machen sollte. Einer solchen Skala kommt bekanntlich in einem Zeitabschnitt zunehmenden Kraftfahrzeugverkehrs (Automobil, Schiff, Flugzeug) besondere praktische Bedeutung zu.

Die sinnesphysiologische Aufgabe war, festzustellen, ob das von Stevens kürzlich formulierte "Kubikwurzelgesetz" (die Empfindung steigt mit der Kubikwurzel aus der Reizenergie) auch für Erschütterungsreize beim Menschen Gültigkeit hat, in ähnlicher Weise, wie das für das Ohr und das Auge von der Stevens'schen Schule gezeigt worden war (19).

2. Literaturübersicht:

In der Mitte des vorigen Jahrhunderts wurde zum ersten Mal von dem Mathematiker und Physiker G.Th. Fechner der Versuch unternommen, die für die Naturwissenschaften so fruchtbare Verwendung von Maß und Zahl auch auf psychologische Begriffe zu erweitern. Er stützt sich dabei auf physiologische Messungen seines Zeitgenossen E.H. Weber und formulierte 1859 die später kurz "psycho-physisches Grundgesetz" benannte logarithmische Beziehung zwischen Reiz und Empfindung. Den Anstoss dazu, die Empfindung, eine psychologische Grösse mit einer Zahl einer quantitativen Messung zugänglich zu machen, erhielt er,

wie Wundt aufzeigte, aus der Herbart'schen Psychologie, der in seiner "Psychologie als Wissenschaft" - noch im Geist der Aufklärung - von der "Stärke einer Vorstellung" spricht und diese "Stärke" auch durchaus quantisierend gesehen wissen will. Von der Stärke der Vorstellung war es dann nur ein kleiner Schritt zur Fechner'schen "Stärke der Empfindung" und weiter zur Aufstellung einer Gleichung zwischen zwei inkommensurablen Grössen, nämlich einer physikalischen, objektiv messbaren Grösse, der Reizstärke und einem nur subjektiv beschreibbaren Bewusstseinsinhalt der Empfindungsstärke. Abgesehen von dieser mathematischen Unlogik im Ansatz des psychophysischen Grundgesetzes enthält dieses trotz seiner weiten Verbreitung vor allem in Kreisen praktisch tätiger Ingenieure einige wesentliche Fehler. So sind wichtige physiologische Parameter der Reizverarbeitung, wie Kontrast und Adaptation überhaupt nicht berücksichtigt. Selbst als Näherung gilt die logarithmische Funktion nur in einem mittleren beschränkten Bereich der Schar S-förmiger Kennlinien zwischen Sinnesorgan und höchsten Neuronen. Erst in der jüngsten Zeit ist indessen eine klar formulierte Kritik an dem Fechner'schen Vorgehen laut geworden (Ranke; Kern u. Ranke (16)).

Lässt sich also auf unmittelbarem Wege eine numerische Skala der Empfindungsstärke mit den Methoden der Naturwissenschaft grundsätzlich nicht aufstellen, so gibt es methodische Kunstgriffe, die dennoch auf indirektem Weg zu quantitativen Vergleichen zweier verschiedener Empfindungen und damit doch zur Aufstellung einer Skala der Empfindungen führen. Das bekannteste am besten gesicherte Verfahren ist die Schwellenmethode der Sinnesphysiologie. Die Angabe "jetzt habe ich gerade eine Empfindung" gegenüber dem Bewusstseinsinhalt "jetzt habe ich sicher noch keine Empfindung" benützt zwar zweifellos einen Bewusstseinsinhalt unter Überschreiten der der Naturwissenschaft gesetzten Grenzen. Vergleicht man aber diesen gleichen Bewusstseinsinhalt "Schwellenempfindung" für verschiedene Reizqualitäten, z.B. beim Ohr für verschiedene Frequenzen

und misst die Reizstärke bei jeder Frequenz jeweils für die "Schwellenempfindung", dann eliminiert man damit die psychologischen Einflüsse wieder aus der Messung, da in der Empfindungsstärke nur gleiche Bewusstseinsinhalte miteinander verglichen werden. Die Messung hat aber neue Aussagen über die Eigenschaften des Sinnesorgans, eben die Schwellenkurve, eine quantitative Aussage also, geliefert.

Nun hat sich aber gezeigt, dass nicht nur der Vergleich zweier Schwellenempfindungen, sondern auch derjenige zweier verschieden starker Empfindungen dann möglich ist, wenn man bestimmte einfache Urteilsbildungen, die in Gehirnschaltungen schon vorhanden sind, zum Vergleich verschiedener Reizstärken ausnutzt. Nach der Gleichheitsaussage 1:1, die in der Schwellenmethode steckt, ist die nächst einfache Aussagemöglichkeit die Fraktionierung im Verhältnis 1:2. Inzwischen sind eine Reihe Versuche gemacht worden, die gezeigt haben, dass derartige subjektive Halbierungen in der Genauigkeit der Angabe nicht hinter der Genauigkeit der Schwellenmessungen zurückstehen. Eine zunächst verwunderliche Tatsache, die aber verständlicher wird, wenn man sich die Bedeutung der Zahl "Zwei" in unserer Zahlenvorstellung oder etwa in dem soziologischen Begriff "Du", des Zweiten also, bewusst macht. Das Zwei und Einhalb ist offensichtlich ein besonders wesentliches Schema (pattern) unserer Gehirnschaltung. Unter Ausnutzung des Bewusstseinsinhaltes "Diesen Reiz empfinde ich halb so stark als jenen" erhält man aber nun nicht, wie bei den Schwellenmessungen einen Horizontalschnitt (z.B. zu verschiedenen Frequenzen gehörende verschiedene Reizstärken bei gleicher Empfindungsstärke), sondern einen Vertikalschnitt, z.B. eine Anzahl von Halbierungsstufen der Empfindung für verschiedene Reizstärken bei gleicher Frequenz (Stevens'sche Sone-Skala). Im einzelnen liegen folgenden Untersuchungen nach diesen Methoden vor:

Richardson und Ross (1930). Die Versuchspersonen hörten Töne zweier verschiedener Intensitäten und waren aufgefordert, den einen der beiden Töne als einen bestimmten Teil oder ein bestimmtes Vielfaches des Anderen abzuschätzen.- Churcher bestätigte im wesentlichen diese Versuche.- Ham und Parkinson benutzten Lautsprecher. Die Versuche wurden auf einen Sinuston von 1000 Hz beschränkt. Die zu einer vorgegebenen Herabsetzung der

Reizstärke gehörende Verminderung der Lautheit musste von der Versuchsperson abgeschätzt werden. Geiger und Firestone verwendeten Kopfhörer für beide Ohren. Die Versuchsperson muss selbst einen zweiten Ton so einstellen, dass das Lautheitsverhältnis beider sukzessiv angebotener Töne 0,01; 0,1; 0,5; 1; 2; 4; 10 und 100 betrug. Die verwendeten Reize waren sinusförmig und hatten eine Frequenz von 1000 Hz und 60 Hz. Es wurde ferner ein zusammengesetzter Klang benutzt.

Die Autoren fanden als wichtiges Teilergebnis, dass die Reihenfolge der dargebotenen Sukzessivreize das Ergebnis beeinflusst. Churcher, King und Davies arbeiteten hauptsächlich mit 800 Hz. Ein Standardton musste halbiert und geviertelt werden. Zweimalige Halbierung führte zum gleichen Ergebnis wie einmalige Vierteilung.

Ein zweites Verfahren, ähnlich der Halbierungsmethode, basiert auf der Tatsache, dass die beiden Ohren im ZNS so zusammengeschaltet sind, dass ein Ton von bestimmter Reizstärke dann, wenn er einem Ohr zugeführt wird, halb so laut ertönt, wie wenn man ihn auf beide Ohren einwirken lässt. Messungen, bei denen der Prüftön so weit verstärkt wird, dass er einohrig gleichlaut klingt, wie der unverstärkte Standardton beidohrig, wurden zuerst durchgeführt von Fletcher und Munson. Ein drittes Verfahren wurde ebenfalls von Fletcher eingeführt: Zwei gleichlaut empfundene Töne, die in der Frequenz so weit auseinanderliegen, dass sie sich nicht verdecken, erlauben die Einstellung zweier Reizstärken eines dritten Tones, der einmal gleichlaut mit Ton 1, ein andermal mit Ton 1 plus 2 eingestellt wird. Dann ist das Lautheitenverhältnis der beiden Einstellungen wieder 1:2.

(Zur Kritik vgl. die Messungen von v. Békésy bei kleinem Frequenzabstand (3)). Alle drei Verfahren liefern praktisch dieselben Ergebnisse.- Fussend auf diesen Vorarbeiten hat Stevens mit Mitarbeitern in einer Reihe von Arbeiten nach dem Halbierungsverfahren (Methode 1) für Ohr, Auge und Kraftsinn, für die Lautheit, die Tonhöhenempfindlichkeit, die Helligkeitsempfindung und die subjektive Belastungsstärke mit Gewichteten Skalen aufgestellt, deren wichtigste "Sone, Mel- und Veg-Skala" (Lautheit, Tonhöhe, Gewicht) benannt worden sind. Die Stevens'sche Methodik sei anhand der Veg-Skala beschrieben, die mit der Vibrationsempfindungsskala die grösste Verwandtschaft hat.

3. Veg-Skala als Beispiel einer bekannten, nach dem Halbierungsverfahren gewonnenen Empfindungsstärkenskala.

Stevens geht von 8 Standardgewichten von 20 bis 2000 g aus. Zu jedem Standardgewicht hat er 6 Vergleichsgewichte, aus denen die Versuchsperson dasjenige Gewicht auswählt, das ihr als halb so schwer erscheint. Aus allen Schätzungen wird in üblicher Weise der Mittelwert gebildet. In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht über seine Versuchsergebnisse zusammengestellt:

Standard-Gewicht in g	Zur Verfügung stehendes Vergleichsgewicht in g						Mittel der gewählten Gewichte in g
20	12,	14,	15,	16,	17,	18,	15,8
40	24,	26,	28,	32,	30,	34,	28,0
70	40,	45,	50,	55,	60,	65,	51,7
100	70,	75,	80,	85,	90,	95,	77,0
300	100,	125,	150,	175,	200,	250,	195,0
500	300,	350,	400,	425,	450,	475,	337,0
1000	500,	550,	600,	650,	700,	750,	645,0
2000	1000,	1300,	1400,	1500,	1700,	1850,	1315,0

Tabelle 1: Versuchsergebnisse von Stevens zur "Veg-Skala".

Nach Übertragung in ein doppel-logarithmisches Diagramm (mit den Ordinaten: Abszisse: Gewicht des Standardgewichtes in Gramm; Ordinate: Gewicht des als halb so gross geschätzten Vergleichsgewichtes) erhält man die Abbildung 1:

Abbildung 1, Auswertungsdiagramm der als halb so schwer wie die Standardgewichte geschätzten Vergleichsgewichte. (Nach Stevens und Mitarbeitern.)

Die Diagonale im Diagramm bezeichnet Gewichtsgleichheit von Standardgewicht und Vergleichsgewicht. Die objektiven Hälften liegen auf einer (nicht eingezeichneten) Geraden, die tiefer liegt als die dick ausgezogene Verbindungslinie der Messpunkte. Sie hat ebenfalls 45° Steigung. Die Messpunkte sind wie folgt eingezeichnet: Bei 100 g Standardgewicht wurden im Mittel 77 g Vergleichsgewicht als halb so schwer geschätzt. Dieser Messpunkt

hat dann die Koordinaten (100;77). Entsprechend hat der Messpunkt für 1000 g Standardgewicht die Koordinaten (1000;645). Man sieht, dass alle Messpunkte recht gut auf einer Geraden liegen, die höher als die objektive Halbierungslinie verläuft und etwas weniger Steigung als 45° aufweist. Man erkennt auch, dass die so gemessenen Werte nicht stärker streuen als bei den üblichen Schwellenmessungen, ohne dass die Sigmawerte bei Stevens angegeben wären. Die Behauptung lässt sich aber auch aus unseren eigenen Messungen erhärten.

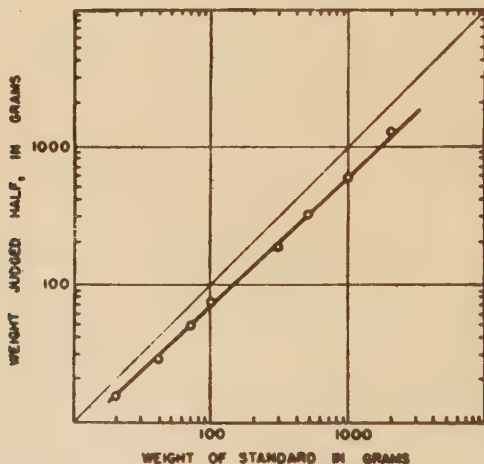


Abbildung 1: Auswertungsdiagramm der als halb so schwer wie die Standardgewichte geschätzten Vergleichsgewichte. Abszisse: Standardgewichte in Gramm; Ordinate: Gewichte der Vergleichsgewichte. Jeder Messpunkt entspricht einem Mittelwert aus Spalte 3 der Tabelle 1. (Nach Stevens und Mitarbeitern.)

Aus diesem Diagramm wird von Stevens auf graphischem Wege die Veg-Skala nach folgendem Schema entnommen:

Geht man davon aus, diejenige Empfindungsstärke, die bei einem Standardgewicht von 100 g auftritt, mit 1 Veg zu bezeichnen, so wird offenbar ein Vergleichsgewicht von 77 g als halb so schwer empfunden. Diesem Gewicht ist also die Empfindungsstärke $1/2$ oder 0,5 Veg zuzuordnen. Andererseits erhält man die Empfindungsstärke 2 Veg, indem man dasjenige Gewicht aufsucht, für wel-

ches ein Vergleichsgewicht als gerade halb so schwer empfunden würde. Dieses Gewicht erhält man dadurch, dass man den Schnittpunkt der Messgeraden mit derjenigen Geraden aufsucht, die zur Abszisse parallel verläuft und in der Ordinate durch den Wert 100 g hindurchgeht. Diese Gerade hat also die Gleichung $y=100$ g. Der Abszissenwert dieses Schnittpunktes beträgt 145 g. Das ist der gesuchte Wert von 2 Veg. Wenn man in solchen Treppenstufen zwischen den beiden eingezeichneten Geraden unter 45 Grad zu höheren Werten voranschreitet, erhält man, wie man sieht, die gesamte Veg-Skala, welche Abbildung 2 wiedergibt. Stevens hat für diese Skala auch eine (empirisch) gefundene Gleichung angegeben, die jedoch in unserem Zusammenhang ohne Interesse ist.

346

HARPER AND STEVENS

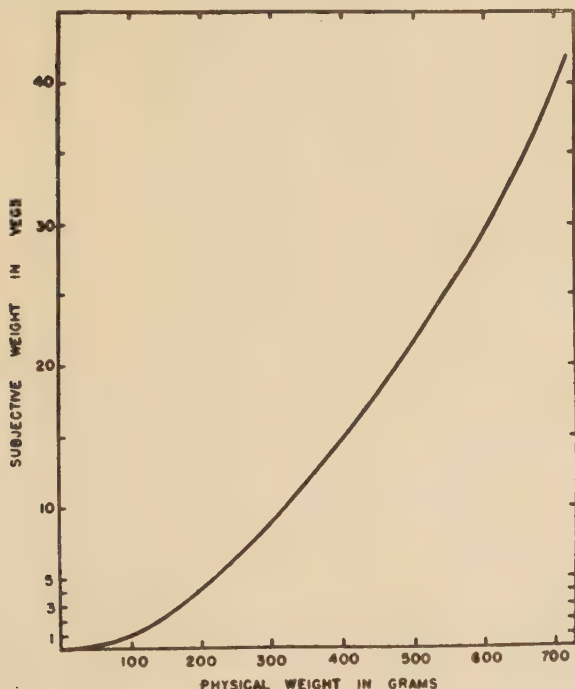


Abbildung 2: "Veg-Skala" nach Stevens. Abszisse: Reizstärke in Gramm. Ordinate: subjektive Empfindungsstärke. Auswertungsverfahren siehe Text! Die Empfindungsstärke bei 100 Gramm ist mit "1 Veg" bezeichnet.

4. Eigene Methodik:

Das Blockschema der elektrischen Einrichtung ist aus Abbildung 3 zu ersehen. Die Sinusspannungen wurden in einem netzbetriebenen handelsüblichen RC-Generator erzeugt, verstärkt und einem elektrodynamischen Vibrator zugeführt. Der Vibrator war auf einem Waagebalken befestigt. An der Waage war eine Handauflage so angebracht, dass der Mittelfinger der rechten Hand der Vibrator-Kolbenfläche mit konstanter Auflage druckaufgelegt werden konnte, da Untersuchungen von Keidel (11) ergeben hatten, dass die Vibrationsempfindungsstärke auflage-druckabhängig ist. Ein verschiebbares Laufgewicht auf dem Balken der Waage erlaubte eine Variation des Auflagedruckes. Er wurde konstant auf 100 g gehalten. Die Auflagefläche konnte zwischen 90 mm^2 und 1 cm^2 variiert werden. In den endgültigen Messreihen betrug sie $0,25 \text{ cm}^2$. Der Vibratorstrom konnte mit Milliampereometer abgelesen werden. Da zwischen der Bewegungsamplitude eines elektrodynamischen Systems und der seine Antriebsspule durchfließenden Stromstärke direkte Proportionalität besteht, wie Autrum (2) gezeigt hat, konnte der Kolbenhub in mA geeicht werden. Bei 50 Hz entsprachen einer Amplitude von $0,25 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ einer Stromstärke von 0,125 mA. Zwischen Verstärkerausgang und Vibrator war eine Potentiometeranordnung so geschaltet, dass Potentiometer I und III dem Vorabgleich diente und vom Versuchsleiter eingestellt wurde, während das Potentiometer von der Versuchsperson so einzustellen war, dass bei Druck der Taste II die Empfindungsstärke halb so gross war, als bei der Darbietung des Standardreizes. Standardreiz wie Vergleichsreiz wurden nicht direkt, sondern über eine Schaltuhr geschaltet, die im Schema der Übersichtlichkeit wegen nicht eingezeichnet wurde. Der Standardreiz wurde in den Stufen 1,6; 3,2; 6,4; und $12,8 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ mit einer wirksamen Dauer von 1,2 Sekunden angeboten. Die verwendeten Frequenzen umfassten ursprünglich den Bereich von 50 bis 800 Hz, doch wurden endgültig nur die Frequenzen 50, 100 und 200 Hz ausgemessen, einmal, weil bei den höchsten Frequenzen die Vibrationsschwellen zu hoch liegen, zum anderen, weil der Vibrator bei 900 Hz eine

Resonanzstelle hatte, die es wegen der starken Dämpfung durch den aufgelegten Finger erlaubte, die Amplituden ohne Frequenzkorrektur aus den abgelesenen Stromstärkewerten im Frequenzbereich 50 - 200 Hz zu bestimmen. Die Vergleichsreizzeiten betrugen bei verschiedenen Versuchsreihen 0,2; 1,2 und 5 sec.

BLOCK-SCHEMA

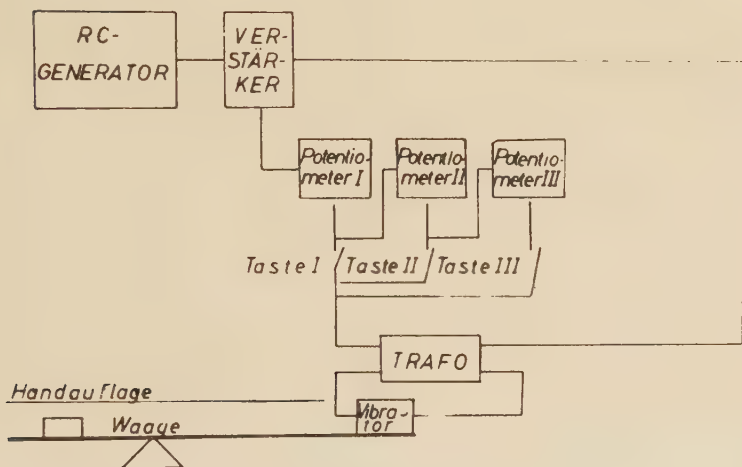


Abbildung 3: Blockschema der Versuchsanordnung. Ausführliche Beschreibung im Text.

In einer besonderen Versuchsreihe, die die Untersuchung des Einflusses des Sukzessivkontrastes zum Ziel hatte, wurden drei Reize angeboten, deren erster und dritter fest so eingestellt waren, dass der eine Reiz objektiv die halbe Reizstärke des anderen hatte, während die Versuchsperson die Aufgabe hatte, den dritten Reiz am Potentiometer so einzustellen, dass die zugehörige Empfindungsstärke zwischen den beiden lag. Bezeichnet man den schwachen Reiz mit a, den starken mit b und den einzustellenden mit c, so wurden die Reihenfolgen abc und bac ge-

messen und das Ergebnis miteinander verglichen. Bei diesen Versuchen betrugen die Reizzeiten einheitlich 1,2 Sekunden. Der Abstand zwischen zwei Reizen betrug bei allen Versuchen 1 Sekunde. Nach 5 Reizserien (also 10 Einzelreizen) wurde eine längere Pause eingelegt, um die Adaptation möglichst gering zu halten. Die Messungen wurden bei schwacher künstlicher Beleuchtung durchgeführt, da helles Licht die Konzentration auf die Vibrationsempfindung verschlechtert. Ebenso wurden akustische Störreize vermieden. Es standen insgesamt 8 Versuchspersonen zur Verfügung, von denen 5 eingehend durchgemessen wurden: eine 39 Jahre alte Ärztin, ein 27 Jahre alter Arzt, ein Zahnarzt im Alter von 26 Jahren, eine Lehrerin im Alter von 23 Jahren und ein 23 Jahre alter Medizinstudent. Auf jeden Messwert treffen pro Versuchsperson 10, insgesamt 50 Messungen also. Da zur Einstellung der Empfindungshalbierung im Durchschnitt 10 Reizgebungen notwendig waren, kommen auf jeden Messpunkt circa 500 Messungen. Die Einzelergebnisse wurden in üblicher Weise statistisch ausgewertet.

5. Ergebnisse:

a. Vergleichsreizdauer ebenso gross wie Standardreizdauer (1,2 sec.).

Das Gesamtergebnis der Messungen im Normfall (Vergleichsreizzeit=Standardreizzeit=1,2 Sekunden) lässt sich in der folgenden Tabelle 2 zusammenfassen:

Frequenz in Hz	Standardreiz in 10^{-3} mm	Mittelwert der als halb so stark empfundenen Vibration in 10^{-3} mm	$\bar{c}$
50	1,6	1,01	0,05
	3,2	2,04	0,08
	6,4	3,80	0,77
	12,8	7,31	0,31
100	1,6	1,02	0,03
	3,2	2,03	0,06
	6,4	3,81	0,09
	12,8	7,53	0,04
200	1,6	1,09	0,05
	3,2	1,93	0,04
	6,4	3,80	0,04
	12,8	6,84	0,36

Tabelle 2: Messergebnisse der Halbierungseinstellungen im Normfall.

Nach Übertragung der Messwerte in ein doppellogarithmisches Koordinatensystem nach Art des Stevens'schen Vorgehens bei der Aufstellung der "Veg-Skala" erhält man für die drei wesentlichen Frequenzen (50, 100 und 200 Hz) die Abbildungen 4a, 4b und 4c. Man erkennt sofort die grundsätzliche Übereinstimmung dieser Kurven mit der Abbildung 1. Auch bei Vibrationsreizen liegen die geschätzten Halbwerte höher als die objektiven Hälften der Standardreizstärken. Wie man weiter sieht, und wie sich aus einem Vergleich der Zahlenreihen der Messwerte ergibt, unterscheiden sich die Ergebnisse bei den verschiedenen untersuchten Frequenzen nicht signifikant voneinander. Wertet man schliesslich die so erhaltenen Kurven graphisch nach dem beschriebenen Treppenverfahren aus, so erhält man damit (für die Frequenzen über 50 Hz und für Reizstärken in Schwellennähe bis zu mittelstarken Reizen) die "Vibronskala",

wie sie für 50, 100 und 200 Hz getrennt in den Abbildungen 5a, 5b und 5c dargestellt worden ist.

Das graphische Auswerteverfahren sei anhand der Abbildung 6 noch einmal ausführlich für die Vibronskala dargestellt:

In das Diagramm sind die bei 50 Hz gewonnenen Messwerte eingezeichnet. Da als Abszisse die Reizstärke in 10^{-3} mm Auslenkung, als Ordinate die gemessenen, subjektiv halbierten Standardreizstärken, also die Vergleichsreizstärken aufgetragen sind, liegen alle 1:1 Werte auf einer Geraden unter 45° und alle objektiven 1:2 Werte auf einer tieferen, dazu parallelen Linie. Verbindet man alle Messwerte der Halbierungseinstellungen, so erhält man eine Gerade, die höher liegt, als die objektive Halbierungslinie und etwas flacher verläuft.- Geht man von $1 \cdot 10^{-3}$ mm Standardreizstärke aus, so findet man den subjektiven Halbierungspunkt bei $0,65 \cdot 10^{-3}$ mm (der oberen Grenze der Streuung der Absolutschwelle entsprechend). Dieser Wert sei der subjektiven Empfindungsstärkeneinheit zugeordnet und mit 1 Vibron bezeichnet. Dann ist $1 \cdot 10^{-3}$ mm Reizstärke von der doppelten Empfindungsstärke begleitet, hat also den Empfindungsstärkenwert 2 Vibron. $1 \cdot 10^{-3}$ mm Reizstärke ist aber zugleich die subjektive Hälfte von $1,61 \cdot 10^{-3}$ mm, dem damit die doppelte Empfindungsstärke, also der Wert 4 Vibron zukommt. $1,61 \cdot 10^{-3}$ mm ist in der Empfindung wieder die Hälfte von $2,6 \cdot 10^{-3}$ mm, dem somit der Wert 8 Vibron entspricht. Auf diese Weise erhält man eine fortlaufende Empfindungsstärkenskala, wie sie die Tabelle im Diagramm links oben erkennen lässt.

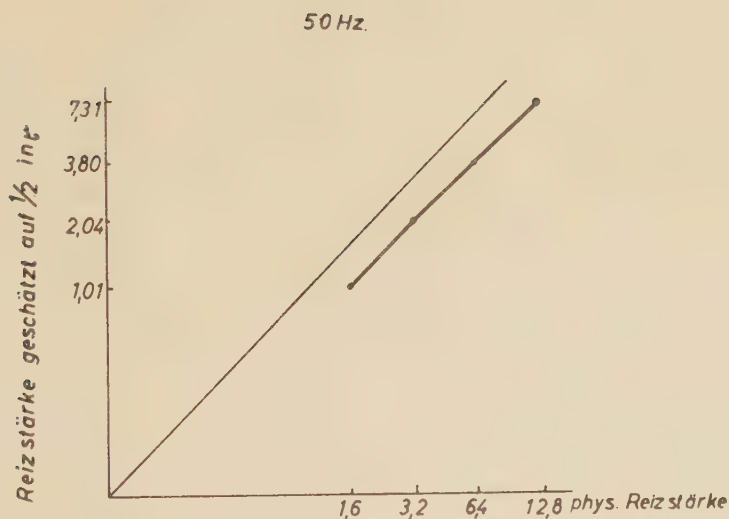
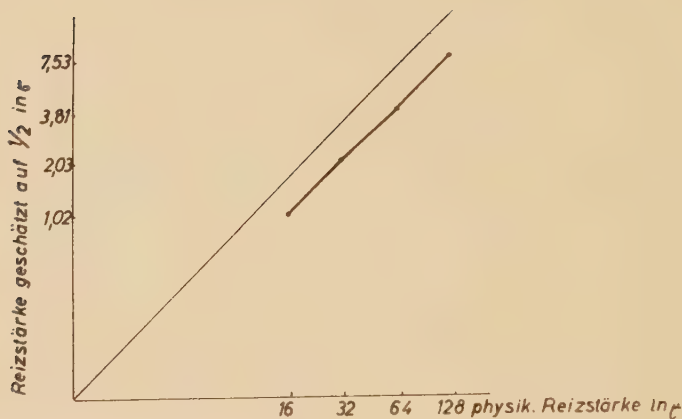
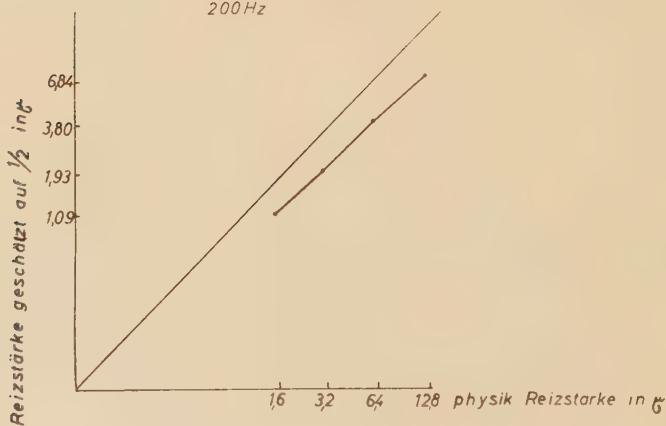


Abbildung 4 a: Auswertungsdiagramm der als halb so stark wie die Standardreize geschätzten Vibrationen mit 50 Hz. Abszisse: Standardreizstärke in 10^{-3} mm Auslenkung des Vibrators. Ordinate: Gemessene Reizstärke der Vergleichsreize, die als halb so stark geschätzt und am Potentiometer eingestellt wurden. Doppellogarithmische Koordinaten. Man vergleiche die prinzipielle Übereinstimmung dieser Kurve mit derjenigen der Abbildung 1.

100 Hz.



200 Hz



Abbildungen 4 b und 4 c: Wie Abbildung 4 a, jedoch bei 100 und 200 Hz Vibrationsfrequenz gemessen. Die Kurven unterscheiden sich nicht grundsätzlich. Die Verschiedenheit der Zahlenwerte ist nicht signifikant (vergleiche Tabelle 2).

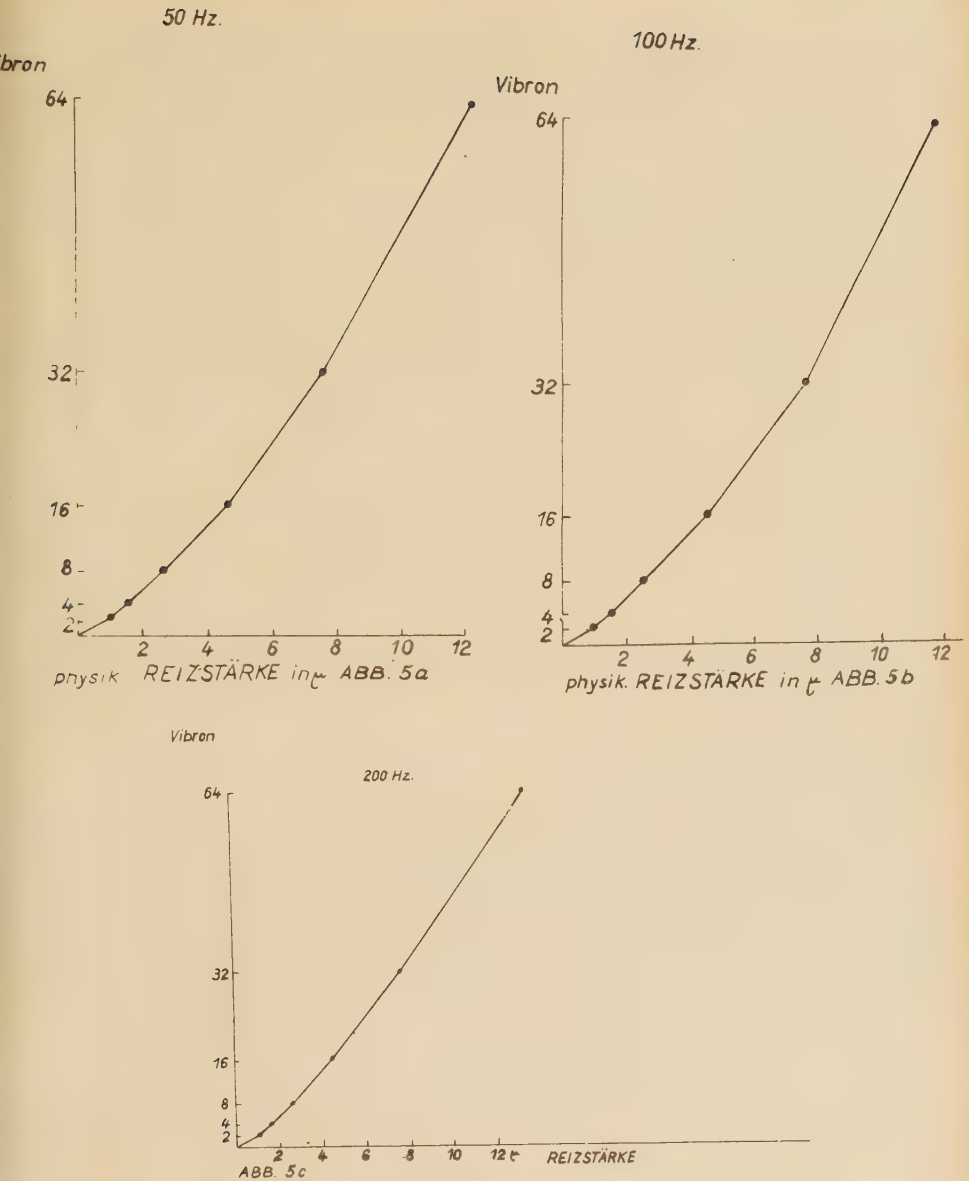


Abbildung 5 a, 5 b und 5 c: Vibronskala für 50, 100 und 200 Hz, durch graphische Auswertung aus den Kurven der Abbildung 4 nach dem Stevens'schen Verfahren gewonnen. Die Skala ist frequenzunabhängig.

b. Standardreizdauer 1,2 Sekunden; Vergleichsreizdauer in die Anklingzeit der Empfindung fallend (0,2 Sekunden) und bis in die Adaptationszeit hineinreichend (5 Sekunden):

Die Ergebnisse im Fall zu kurzer und zu langer Vergleichsreizzeiten sind aus der folgenden Tabelle 3 zu ersehen:

Standardreizstärke in 10^{-3} mm	als halb so stark empfundene Vergleichs- reizstärke bei einer Vergleichsreizdauer von					
	0,2 Sek.		1,2 Sek.		5 Sek.	
1,6	1,26	0,04	1,09	0,03	1,10	0,04
3,2	2,48	0,07	2,14	0,08	2,14	0,07
6,4	4,48	0,76	3,80	0,77	3,80	0,83
12,8	8,44	0,35	7,06	0,23	7,08	0,36

Tabelle 3: Halbierungsmessungen bei zu kurzer und zu langer Vergleichsreizdauer (2. und 4. Spalte) verglichen mit der Normdauer (3. Spalte) Reizfrequenz 50 Hz.

Von einer Frequenzvariation wurde bei diesen Versuchsreihen abgesehen, da die Normergebnisse keine Frequenzabhängigkeit erwarten lassen. In Abbildung 7 a und 7 b sind die Messergebnisse wieder wie in Abbildung 1 und Abbildung 4 in ein Doppellogarithmisches Koordinatensystem eingetragen. Man erkennt schon in dieser Darstellung, ebenso wie in den Tabellenwerten die erhebliche Abhängigkeit der Messergebnisse von der Vergleichsreizdauer.

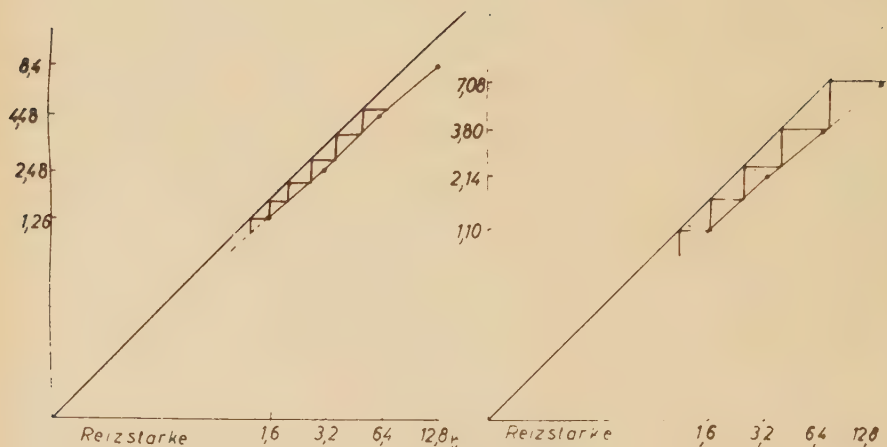


Abbildung 7 a und 7 b: Links Halbierungskurve bei 0,2 Sekunden Vergleichsreizdauer. Rechts bei 1 und 5 Sekunden Vergleichsreizdauer. Eine Verlängerung der Reizdauer verändert die Ergebnisse nicht. Dagegen ist eine Verkürzung unter die Anklingzeit der Empfindung von wesentlichem Einfluss auf die Messwerte, die dabei zu hoch angegeben werden.

Die graphische Auswertung dieser Kurven nach dem Treppenverfahren führt auch für zu lange Reizzeiten zur gleichen Vibronskala wie bei den Normreizzeiten von 1,2 Sekunden (ausgezogene Kurve der Abbildung 8 b). Dagegen wird eine mit zu kurzen Reizzeiten gewonnene "Vibronskala" zu steil und ist damit "falsch" (ausgezogene Kurve der Abbildung 8 a; gestrichelte Kurve der Abbildung 8 b).

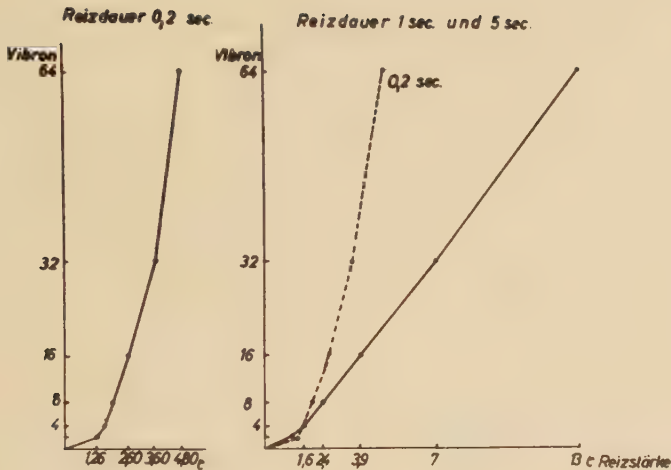


Abbildung 8 a und 8 b: "Richtige" Vibronskala, gemessen bei Vergleichsreizzeiten über der Anklingzeit der Empfindung (rechts ausgezogen) im Vergleich zu der steilen "falschen" Skala, die man bei der Auswertung der Messergebnisse bei zu kurzen Reizzeiten im Zeitabschnitt der Anklingzeit der Empfindung erhält (linke Kurve; gestrichelte Kurve im rechten Diagramm).

c. Einfluss des Sukzessivkontrastes:

Erhält die Versuchsperson den Auftrag, zwischen zwei nacheinander angebotenen Standardreizen, die ein Reizstärkeverhältnis von 1:2 aufweisen, subjektiv jenen Wert einzustellen, der in der Empfindung in der Mitte zwischen den beiden Standardreizen zu liegen scheint, so ist in Analogie zu den Erscheinungen des Sukzessivkontrastes bei anderen Sinnesorganen eine Abhängigkeit von der Reihenfolge der beiden Standardreize zu erwarten. Zur Überprüfung dieses Gedankenganges wurden Versuchsreihen durchgeführt, deren Ergebnisse die folgenden Tabellen 4 und 5 veranschaulichen. Die Messungen wurden bei 50 Hz und einheitlicher Reizdauer von 1,2 Sekunden durchgeführt.

Reizstärke des zuerst angebo- tenen Standard- reizes in 10^{-3} mm	Reizstärke des anschliessend angebotenen zwei- ten Standardreizes	Als zwischen beiden Reizstärken liegende geschätzte Vergleichs- reizstärke in 10^{-3} mm	
			$\bar{c}$
0,8	1,6	1,16	0,06
1,6	3,2	2,42	0,08
3,2	6,4	4,30	0,21
6,4	12,8	9,64	0,45

Tabelle 4: Mittelwerteinstellung bei der Reihenfolge:
schwacher Standardreiz - starker Standard-
reiz - Vergleichsreiz.

Reizstärke des zuerst angebotenen Standardreizes in 10^{-3} mm	Reizstärke des anschliessend angebotenen zweiten Standardreizes	Als zwischen beiden Reizstärken liegende geschätzte Vergleichs- reizstärke in 10^{-3} mm	
		$\bar{c}$	
1,6	0,8	0,992	0,05
3,2	1,6	2,22	0,07
6,4	3,2	4,28	0,27
12,8	6,4	9,40	0,47

Tabelle 5: Mittelwerteinstellung bei der Reihenfolge:
starker Standardreiz - schwacher Standardreiz - Vergleichsreiz.

In Abbildung 9 a und 9 b sind die Ergebnisse wieder im doppellogarithmischen Koordinatensystem eingetragen. Wie man sieht und wie auch die Tabellenwerte erkennen lassen, unterscheiden sich die beiden Messreihen bei den angewandten (für das Auftreten einer Adaptationseinstellung zu kurzen) Messreihen nicht signifikant, zumindest in dem untersuchten Reizstärkenbereich der schwachen und mittelstarken Reize.

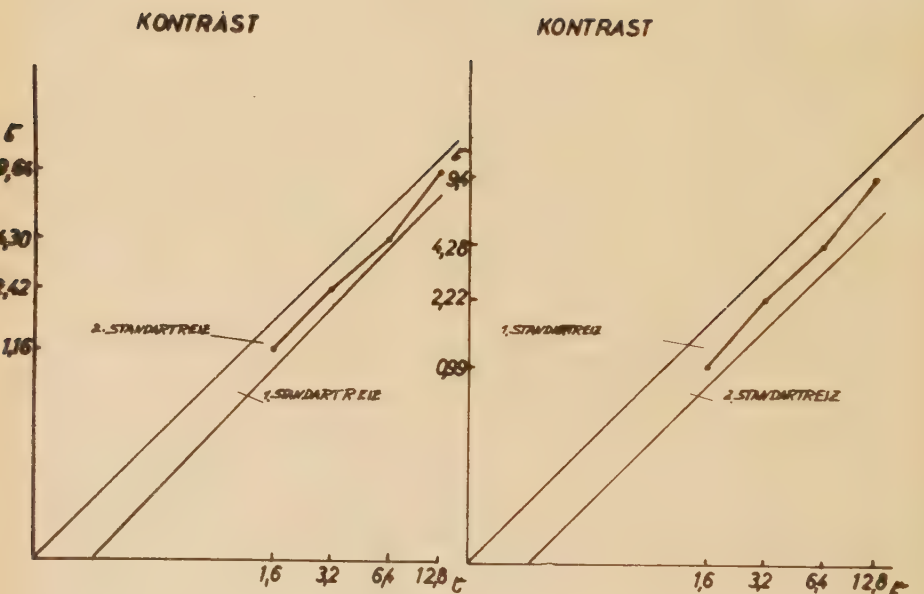


Abbildung 9 a und 9 b: Links Mittelwertskurve bei Reizreihenfolge: schwacher Standardreiz - starker Standardreiz - Vergleichsreiz. Rechts Mittelwertskurve bei Reizreihenfolge: starker Standardreiz - schwacher Standardreiz - Vergleichsreiz. Der Sukzessivkontrast hat keinen signifikanten Einfluss auf die Messergebnisse. Man beachte die stärkere statistische Streuung der Messergebnisse, sichtbar an der stärkeren Abweichung der Messpunkte von der Verbindungsgeraden.

Es muss darauf aufmerksam gemacht werden, dass sich aus diesen Kurven nicht nach dem Treppenverfahren eine Vibronskala ableiten lässt. Sie dürfen auch nicht ohne weiteres mit den Abbildungen 1, 4 und 7 verglichen werden, da hier keine Halbierungs- sondern Mittelwertseinstellungen als Aufgabe vorlagen. Die Werte liegen deshalb notwendig höher als die Halbierungseinstellungen, die als Mittelwertseinstellungen gegen Null aufgefasst werden können.

d. Vergleich zwischen Veg- und Vibronskala:

Die erstaunlich ähnliche Form der beiden Kurven, welche die Veg- und Vibronskala darstellen, ist aus Abbildung 10 zu ersehen. Als Empfindungseinheit ist von Stevens 1 Veg = Empfindungsstärke bei 100 g Gewicht gewählt worden. Für die Vibronskala ist 1 Vibron derjenigen Empfindung zugeordnet, die die Vibration mit $0,65 \cdot 10^{-3}$ mm Amplitude bei 50 Hz Vibrationsfrequenz auslöst. Entsprechend bedeuten die Zahlen in der Abszisse einmal (für die Veg-Skala) Gramm und zum andern (für die Vibronskala) Hundertstel 10^{-3} mm. Die Zahl "100" bezeichnet also $1 \cdot 10^{-3}$ mm. Die Ordinate gibt unmittelbar die Veg- und Vibron-Werte an, die von den in der Abszisse stehenden Reizstärken ausgelöst werden. Man kann die Abbildung auch als aus den Abbildungen 2 und 5 a zusammengesetzt betrachten. Die grundsätzlich gut vergleichbare Form ist gut zu erkennen.

Dem entspricht auch die Tatsache, dass das kürzlich (1953) von Stevens formulierte "Kubikwurzelgesetz" auch für die Vibronskala Gültigkeit hat. Es besagt, dass die Empfindungsstärke proportional zur dritten Wurzel aus der Reizenergie ansteigt und gilt nach Stevens für die Sone-Skala beim Ohr und ebenso für die Helligkeitsempfindung beim Auge. Setzt man nämlich entsprechend der kinetischen Energie $1/2 m \cdot v^2$ bei einer konstanten Frequenz die jeweilige Reizenergie proportional dem Quadrat aus der Amplitude multipliziert mit einer Proportionalitätskonstanten an, so erhält man in tabellarischer Form das

folgende Ergebnis für die in geometrischer Reihe fortschreitenden Vibronstufen:

Vibronzahl	Reizstärke in 10^{-3} mm	Dritte Wurzel aus dem Amplitudenquadrat	$Q \frac{n+1}{1}$
1	0,65	0,751	1,338
2	1,00	1,000	1,368
4	1,60	1,368	1,385
8	2,60	1,89	1,403
16	4,3	2,65	1,439
32	7,4	3,80	1,394

Wie man sieht, steigt sowohl die Vibronskala mit einem konstanten Faktor (2) an, wie auch der Wert der Kubikwurzel (Faktor 1,4).

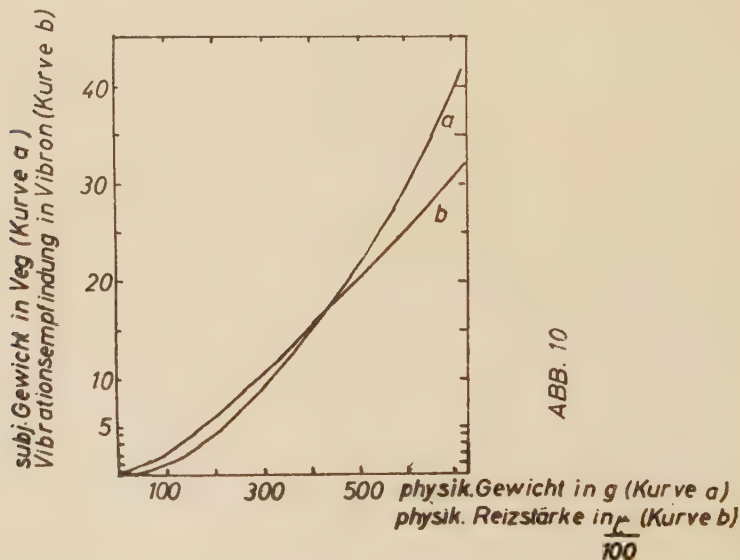


Abbildung 10: Vergleich zwischen Veg- und Vibronskala. Abszisse für Kurve (a), die Veg-Skala: Gramm, für Kurve (b), die Vibron-Skala: Hundertstel 10^{-3} mm Amplitude der Vibration. Ordinate: Zahlenwert für Veg und Vibron. Man sieht die gute Übereinstimmung des Kurvenverlaufs.

6. Besprechung der Ergebnisse:

Schon die Messungen im Frequenzbereich zwischen 50 und 200 Hz bei schwachen und mittleren Reizstärken führten, wie gezeigt worden ist, zur Aufstellung einer subjektiven Empfindungsstärkenskala für die Vibrationsempfindung und damit für die Erschütterungsempfindlichkeit des Menschen bei kleinflächiger Erschütterung von Körperteilen, in unserem Falle des Mittelfingers, die offensichtlich weitgehende Analogien zu ähnlichen, nach dem Halbierungsverfahren gewonnenen Empfindungsstärken aufweist. Auch die Sone- und Mel-Skala, die Skala für die Helligkeitsempfindung und die Veg-Skala haben grundsätzlich die gleiche Verlaufsform wie die Vibron-Skala und gehorchen (als Näherung) dem Stevens'schen Kubikwurzelgesetz. Das berechtigt zu der Hoffnung, dass die Vibronskala auch im praktischen Gebrauch als Maß für diejenigen Erschütterungsbelastigungen des Menschen, die über Sinnesrezeptoren ausgelöst werden, Bedeutung gewinnen und sich bewähren kann. Dazu wird freilich noch eine praktische Überprüfung, etwa im Kraftfahrzeugverkehr notwendig sein. Weiterhin bedarf die Skala ergänzender Messungen bei hohen Reizstärken bis in die Nähe der Unerträglichkeit und bei niederen Frequenzen unterhalb der für die Vibrationsreception relativ hohen Frequenzen von 50 Hz.

Mir waren derartige Messungen aus apparativen Gründen nicht möglich. Mit diesem Vorbehalt erlauben die vorliegenden Messungen folgende Aussage: Im untersuchten Frequenzbereich war die Form und besonders die Steilheit der als Kurve gezeichneten Skala frequenzunabhängig und wurde durch Verlängerung der Vergleichsreizzeiten bis zur Dauer von 5 Sekunden, also in einem Zeitabschnitt, wo sicher schon Adaptationserscheinungen auftreten, nicht verändert. Dagegen erhält man falsche Messwerte, wenn man die mit Vergleichsreizzeiten von 1,2 Sekunden gewonnene Vibronskala auf Vibrationen anwendet, die kürzer als 1,2 Sekunden dauern. Das ist gut verständlich, wenn man bedenkt, dass die Zeitdauer bis zum Anklingen der vollen Empfindung bei der Vibrationsreception relativ lange ist, nämlich 1,2 Sekunden wie G. v. Békésy gefunden hat (3).

Bei zu kurzen Vergleichsreizzeiten werden die Halbierungswerte zu gross eingestellt. Das ist daraus verständlich, dass dann die Empfindung noch nicht voll angeklungen ist, also mit einem Dauerreiz im Vergleich als zu klein empfunden wird. Um trotzdem den Eindruck der Halbierung gegenüber dem Standardreiz auszulösen, muss der Vergleichsreiz stärker gewählt werden, als unter Normalbedingungen. Die Folge ist, dass eine unter solchen Messbedingungen gewonnene Skala rascher ansteigt, also eine Steilheitszunahme gegenüber der Normskala ergibt. Die andere Folge ist, dass die Aufdeckung dieser Tatsache bei Verwendung der Normskala zur Vorsicht gegenüber der subjektiven Werteskala bei der Bewertung von Reizen zwingt, die kürzer als die Anklingzeit der Empfindung des betreffenden Sinnes dauern. Das gilt ganz allgemein für alle nach dem Halbierungsverfahren gewonnenen Skalen und ist bisher noch nicht genügend berücksichtigt worden.

Die Ergebnisse der Mittelwertseinstellungen zwischen zwei nacheinander vor dem Vergleichsreiz angebotenen Standardreize zum Zwecke der Untersuchung des Einflusses des Sukzessivkontrastes haben gezeigt, dass es für die Wahl der Reizstärke des Vergleichsreizes bei Vibrationsreizen und Darbietungszeiten von 1,2 Sekunden mit einer Vibrationsfrequenz von 50 Hz gleichgültig ist, ob die Reize in der Reihenfolge abc oder cab angeboten werden. Hieraus kann geschlossen werden, dass es für die Aufstellung derartiger subjektiver Empfindungsstärkenskalen belanglos ist, ob man das Halbierungs- oder das Verdoppelungsverfahren anwendet, was wegen der nicht ganz einheitlichen Literaturangaben hierüber nicht ganz selbstverständlich war. Denn die Halbierungsmessung stellt einen Extremfall der Mittelwertseinstellung der Reihenfolge schwach - stark - Vergleichsreiz, die Verdoppelungsmessung ganz analog der Reihenfolge stark - schwach - Vergleichsreiz dar. Man sieht sofort, dass für den damit beschriebenen Übergang nur der schwache Standardreiz gleich Null gesetzt werden muss. Das bedeutet, dass man trotz der grundsätzlichen Gleichwertigkeit beider Verfahren der Halbierungsmessung den Vorzug geben sollte, da dabei bei gleicher Ausgangsreizstärke die Gesamtadaptation des untersuchten Sinnes kleiner gehalten werden kann, als bei dem Verdoppelungsverfahren. Darin liegt der Wert dieser Kontrastversuche, wiederum über den speziellen Fall der Aufstellung der Vibronskala hinausgehend.

Die stärkere beobachtete Streuung spricht ferner dafür, dass das Muster "Halbierung" einfacher ist, als das zu der komplizierten Urteilsbildung "Mittelwert zwischen zwei verschieden starken Reizen" benützte. Derartige Messungen sind also mehr "psychologisch" als das Halbierungsverfahren und enthalten mehr Fehlerquellen, wie Aufmerksamkeitseinfluss, zentrale Ermüdung und sofort.- Die Messungen schliessen nicht aus, dass bei grösseren Reizstärken die Reihenfolge abc, cab doch nicht ohne Einfluss auf die Messungen sein muss. Man würde erwarten, dass dann, wenn der zweite Standardreiz unmittelbar vor dem Vergleichsreiz der stärkere war, wegen der damit verbundenen stärkeren Adaptation der Vergleichsreiz grösser eingestellt wird, als im umgekehrten Falle. Die gefundenen Werte bei den höchsten untersuchten Reizstärken (9,64 gegenüber 9,4) sprechen dafür, sind aber statistisch nicht zu sichern. Da für unsere Messungen die vorliegenden Ergebnisse zur Sicherung der Berechtigung unserer Vibronskala ausreichten, wurde die Kontrastfrage nicht eigens näher untersucht. Sie scheint aber noch einer Abklärung bei grössten Reizstärken zu bedürfen.

7. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass in der vorliegenden Arbeit die Problemstellung, ein subjektives Empfindungsstärkenmass für die Vibrationsempfindung des Menschen aufzustellen, für die untersuchten Frequenzen und Reizstärken gelöst werden konnte. Die gefundene Vibronskala fällt in ihrem Verlauf weitgehend mit der für den Kraftsinn von Stevens gefundenen Veg-Skala zusammen und gehorcht dem "Kubikwurzelgesetz", wenn die Vibronwerte in geometrischer Reihe aufgetragen werden.-

Das Verfahren zur Gewinnung dieser Skala wurde beschrieben. Als Grenzbedingung für alle nach dem Verfahren gemessenen subjektiven Empfindungsstärkenskalen wurde gefunden, dass Reize, die kürzer als die Anklingzeit der zugehörigen Empfindung dauern, durch so gewonnene Skalen falsch, und zwar zu niedrig bewertet werden.- Die Steilheit der Skala ist im untersuchten Frequenzbereich frequenzunabhängig und bis zu den Reizzeiten von 5 Sekunden auch adaptationsunabhängig. Der Sukzessivkontrast ist bei Messzeiten in der Grössenordnung der Anklingzeit der Empfindung ohne signifikanten Einfluss auf die Form der Skala. Hieraus wird abgeleitet, dass Halbierungs- und Verdoppelungsmethode zur Aufstellung solcher Skalen an

sich gleichwertig sind, wegen der geringeren Adaptationsbelastung, die bei sehr grossen Reizstärken jedoch bei dem Halbierungsverfahren zu erwarten ist, die Halbierungsmethode vorgezogen werden sollte.

Herrn Professor Dr. O.F. R a n k e bin ich für die Möglichkeit an seinem Institut zu arbeiten, Herrn Professor Dr. W.D. K e i d e l für die Überlassung des Themas und seinen Rat bei der Durchführung der Arbeit, zu Dank verpflichtet.

8. Literatur:

1. Adrian, Mc Keen, Cattell and Hoagland: J. of Phys. 72, 377 (1931).
2. Autrum: Naturwissenschaften 39, 290 (1952).
3. v. Békésy: J. Acoust. Soc. Americ. 23, 576 (1951).
4. Bertalanffy: Theoretische Biologie, II. Bd. Bern: A. Francke (1951).
5. Dodt u. Zottermann: Acta physiol. scand. (Stockh.) 26, 358 (1952).
6. Echlin and Fessard: J. of Physiol. 93, 312 (1938).
7. v. Frey: Handbuch Bethe-Bergmann Bd. XI S. 94-130.
8. Granit: Erg. Physiol. 46, 31 (1950).
9. Hecht: Erg. Physiol. 32, 243 (1931).
10. Hensel: Erg. Physiol. 47, 166 (1952).
11. Keidel, W.D.: Vibrationsreception. Erlanger Forschungen Reihe B: Naturwissenschaften Band 2. Verlag: Universitätsbund Erlangen. Auslieferung: Universitätsbibliothek Erlangen (1956).
Die Auflagedruck- und Ortsabhängigkeit der Vibrationssinnesschwellen des Menschen. Pflügers Archiv 256, 242-264 (1952).
12. Matthews: J. of Physiol. 78, 1 (1933).
13. Newman, Doupe and William: Brain 62, 31 (1939).
14. Pfaffmann: J. of Physiol. 97, 220 (1939).
15. Pütter: Pflügers Arch. 171, 201 (1918) 180, 260 (1920).
16. Ranke: Vortrag, Tagung, Regelung. Darmstadt 1954; Z. Biol. 105, 224 (1952).
17. Sand: Proc. Roy. Soc. Lond. B 123, 472 (1937), B 125, 524 (1938).
18. Sato und Tasaki: Jap. J. Physiol. 1, 173 (1951).
19. Stevens, Galambos und Davis: Hearing, its psychology and physiology, 3. Aufl. New York: J. Wiley 1948.- J. of Neurophysiol. 6, 39 (1943).
20. Stevens, S.S.: The measurement of sensation. Periodic status report XXII Harvard University Psychoacoustic Laboratory Nov. 1953.
21. Svaetichin: Vortrag Tagung Deutsche Physiol. Ges. Hamburg 1952.
22. Wagner, R.: Probleme und Beispiele biologischer Regelung. Stuttgart: Thieme 1954.
23. Zottermann: Scand. Arch. Physiol. (Berl. u. Lpz.) 75, 105 (1936).

Lebenslauf

Am 24. Februar 1921 wurde ich als zweiter Sohn des Stadtbauingenieurs Adolf Dindinger in Bromberg geboren. Dort besuchte ich das Gymnasium und machte 1939 mein Abitur. Bis 1945 war ich Soldat. Ich wurde während des Krieges als Flieger 4 mal verwundet. 1945 für kurze Zeit in amerikanischer Gefangenschaft. 1946 Medizinstudium in München, das ich aus finanziellen Gründen abbrechen musste. Bis 1952 in der Industrie als Feinmechanikerlehrling, Optikerlehre, Objektivprüfer und Feinmessgehilfe bei Zeiss. Zuletzt dort technischer Kaufmann. 1950 heiratete ich die praktische Ärztin Dr. med. Carla Früchte. Wintersemester 1952 Beginn des zahnärztlichen Studiums in Erlangen. Wintersemester 1954 Studium an der Universität in Würzburg. Sommersemester 1955 Studium in Frankfurt/Main. Dort am 12. Juli 1956 Staatsexamen.

